

# 高密度电法在风电场工程溶洞勘查中的应用

冯磊<sup>1,2</sup> 王培<sup>1,2</sup> 郭慧芬<sup>1,2</sup> 冯芹<sup>1,2</sup> 曩伊博<sup>1,2</sup>

1. 河南省地质局矿产资源勘查中心 河南 郑州 450000

2. 河南省自然资源科技创新中心(地球物理深部探测研究) 河南 郑州 450000

**摘要:** 本文介绍了高密度电法在风电场工程地基下是否存在溶洞勘查研究, 确认在工程中能精准探测地层是否存在空洞和软弱层。并以风电场工程为例, 根据施工场地设计满足探测条件的位置, 确保野外真实可靠; 其次经过在已知溶洞试验及对采集数据的处理分析、解释推断, 认为利用高密度电法技术探测地层是否存在空洞和软弱层是可行有效的; 最后经钻探验证, 探测成果与实际情况吻合, 证明了探测成果可靠, 为工程施工提供科学依据。

**关键词:** 高密度电法; 溶洞; 风电场; 资料处理和解释

引言: 近年来, 清洁能源发展成为各国共同关注的焦点, 清洁能源是指对环境友好且可持续发展的能源, 风能是最为广泛应用的清洁能源之一。风电设备的效率不断提高, 风电场的建设规模也越来越大。为了确保风电机组的安全和稳定运行, 风电场的建设在设计在建设地基时, 需要考虑多个重要因素, 地形地质条件就是其中之一, 尤其是地基下的空洞和软弱地层, 对风电场的建设有很大的危害, 需要勘查探明。经现场踏勘、试验, 高密度电法具备勘查风电场的建设场地溶洞的条件, 本次主要讨论高密度电法勘探在风电场的建设场地溶洞方面的勘查思路、施工方案及应用效果。

## 1 方法原理

高密度电法是20世纪80年代提出来的一种电法勘探新技术, 其理论与常规电法相同, 是以岩、土介质导电性差异为基础, 研究人工施加稳定电流场的作用下地下传导电流分布规律的一种阵列勘探方法。野外测量时将全部电极(几十至上百根)置于观测剖面的各测点上, 每根电极既是供电电极又是测量电极。由人工向地下发送电流, 使地下形成稳定的电流场, 利用多路程控电极转换器选择不同的电极组合方式和不同极距间隔, 实现野外数据快速、自动采集。兼具断面法和测深法的功能, 具有测点密度大、信息量大、工作效率高等特点。通过转换装置控制电极间的不同排列组合, 能够实现直流电法勘探中的各种装置形式的探测, 如温纳、偶极、施贝、微分等, 可以提供更多的地电断面信息, 有利于对比分析, 充分发挥物探技术在勘查中作用。物探方法能在不破坏地表的情况下, 探知地层结构、地下水、溶洞的电阻率状况, 反映低电导率(溶洞含泥水)、高电导率(溶洞为空)的大致分布趋势<sup>[1]</sup>。

## 2 野外工作方法

### 2.1 地质及地球物理条件

工程区出露的地层主要为: 第四系残坡积( $Q^{el+dl}$ )黏性土、含碎石黏性土、下伏基岩为三叠系中统嘉陵江组( $T_2j$ )及三叠系下统大冶组( $T_1d$ )灰岩, 二叠系下统茅口组( $P_1m$ )及二叠系下统栖霞组( $P_1m$ )灰岩, 石炭系中统黄龙组( $C_2h$ )灰岩, 志留系( $S$ )砂岩等。

工程区断层较发育, 主要以东西向逆断层为主, 南北正断层为辅。地质构造对岩溶发育的关系极为密切。它不仅控制着岩溶发育的方向, 而且还影响着岩溶发育的规模和大小。断裂构造使岩层产生大量裂隙, 为岩溶水活动和岩溶作用提供了极为有利的条件, 岩溶常常沿着断裂破碎带发育。

工程区白云岩及白云质灰岩地层中为主要岩溶发育层带, 地表岩石溶蚀现象广泛, 岩层面水冲溶触现象十分发育, 形成广泛密集的溶蚀沟。根据本次对称小四极激电测深和小极距高密度物性试验各岩层电性特征如下: 第一层黏性土 $150 \Omega \cdot m$ 左右; 第二层含黏性土碎石 $500 \Omega \cdot m$ 左右; 第三层风化灰岩 $1500 \Omega \cdot m$ 左右; 白云岩及白云质灰岩大于 $2000 \Omega \cdot m$ 左右; 干溶洞 $5000 \Omega \cdot m$ 左右。这些物性特性为解释本区地下溶洞及熔岩发育提供了依据<sup>[2]</sup>。

### 2.2 工作布置

风电场的建设场地YS11位于山顶, 西、南、北三面地表生长竹林, 东面地表生长带刺的低藤植被。北面距场地中心约10m为陡崖。场地附近第四系覆盖较厚, 出露岩石较少。场地布设了6条剖面测量, 东西3条, 60道接收, 线距5m, 点距2m; 南北3条, 60道接收, 线距5m, 点距1m。呈网格状, 见图1。

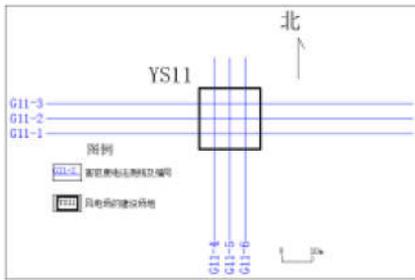


图1 物探工作布置图

### 2.3 高密度电法效果试验

本次试验地点选在已知溶洞（南北断层形成的落水洞）。测量洞的数据为：地面到洞底约8.1 m，地面到洞顶约4.2 m，洞口南北长约7.7 m，东西长约4.6 m，洞里

（西）高约3.1 m，洞外（东）高约3.8 m。在溶洞上布设一条南北测线SY-G1，点距2m，60道接收，温纳装置。

从高密度电法剖面电阻率反演、综合解释图可以看出：高密度电法剖面上电阻率异常反映明显，深部稳定地层电阻率最高，向地表逐渐降低，在溶洞底部含水电阻率最低。然后向地表电阻率逐渐增高，在溶洞中心达到最大，再向地表逐渐减低。最终形成上高阻下低阻“脸盆”状的溶洞，与实际溶洞情况吻合，探测溶洞中心平面位置偏差均小于0.5m。见图2。

通过在已知溶洞上所做的高密度电法试验表明，本次选用高密度电法探测溶洞方法有效，勘查效果显著，此方法可以在本工作区进行下一步探测。

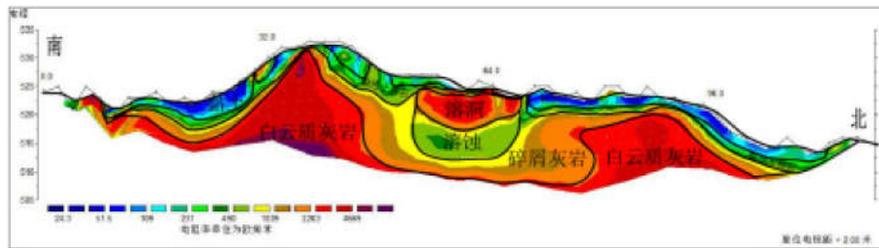


图2 高密度电法SY-G1试验剖面电阻率反演、综合解释图

## 3 数据采集、处理及推断解释

### 3.1 数据采集、处理

野外数据采集需注意点：①保证电极接地良好，数据采集前，检测每个电极的接地电阻，保证接地电阻  $\leq 5k\Omega \cdot m$ ；②记录排列及测量情况，以供质量监控和数据处理；③采集过程全程监控，发现异常情况及时处理，保证采集数据的真实可靠；④数据采集时进行实时观测，所有测点的数据均稳定变化，测量电压 $\Delta U$ 均大于3mV，供电电流I均大于3mA。

当日工作结束，通过仪器USB接口直接传到计算机中，并100%核准后保存进行备份。然后利用计算机软件对原始观测结果进行检查复算，初步判断采集数据的可靠性，然后进行数据处理。通过格式转换程序WDAFC把原始数据文件\*.WDA转成处理软件格式。再进行突变点剔除、数据平滑预处理。本次利用Loke编写的2D电阻率反演软件RES2DINV进行处理<sup>[3]</sup>。

具体数据处理一般经过以下几个步骤：①将测量仪器中的野外观测数据传输到计算机中；②明显不合理的劣质数据删去，为数据的处理解释作准备；③若某剖面长度较长，由2个和2个以上排列构成，则需要把几个排列的数据文件有序地合成一个数据文件；④依据工作区地质、地形条件选择合适参数进行反演解释，输出反演解释结果；⑤若对反演解释结果比较满意，则按要求输

出最终的正式反演解释结果。

### 3.2 推断解释

选取布设测线中具有代表性的东西向G11-2、南北向G11-5测线进行分析解释。

①从高密度电法G11-2剖面电阻率反演图和综合解释图可以看出：剖面地层完整，成层性连续性较好，见图3。

YS11风电场工程场地范围为剖面50 m-70 m段，依据电性的不同从上到下依次可以划分为粘土、粘土夹碎石、碎屑灰岩和白云质灰岩层。0 m-40 m段，粘土层厚度约在1.5 m，粘土夹碎石逐渐变薄从2.7 m-0.3 m，碎屑灰岩层逐渐变厚从3.4 m-10.7 m，且32 m-44 m出现明显凹陷；40 m-50 m段，地表有岩石出露，深部粘土夹碎石、碎屑灰岩层向西倾斜有局部凹陷的现象；50 m-120 m段，层厚较均匀，粘土层厚度约在3.5 m，粘土夹碎石约在1.4 m，碎屑灰岩层约在2.9 m。60-70 m、95 m附近出现凹陷，71-74 m有碎石出露。剖面中深部为白云质灰岩<sup>[4]</sup>。

综上所述，高密度电法G11-2剖面风电场工程场地内没有与已知溶洞模型相似的溶洞异常显示，50 m位置向西倾斜有凹陷，建议此处地基边界深挖处理。60-70 m有明显凹陷，推测为低洼冲沟。建议此处地基打钻验证，设计钻孔ZK1，深度10m。

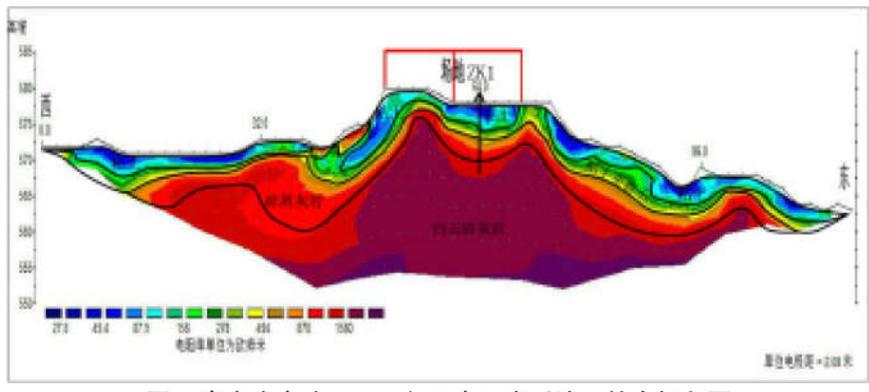


图3 高密度电法G11-2剖面电阻率反演、综合解释图

②从高密度电法G11-5剖面电阻率反演、综合解释图可以看出：剖面地层较完整，成层性连续性较好，见图4。

YS11风电场工程场地范围为剖面30m-50m段，依据电性的不同从上到下依次可以划分为粘土、粘土夹碎石、碎屑灰岩和白云质灰岩层。0m-17m段，粘土厚度约在1.6 m；17m-40 m段，地表出露粘土夹碎石、碎屑灰

岩、白云质灰岩，出现凹陷现象，粘土厚度约在1.7 m；40m-50 m段，出现较大凹陷现象，地表出露粘土夹碎石、碎屑灰岩；50 m-60 m段，粘土厚度约在0.5 m。

综上所述，高密度电法G11-5剖面风电场工程场地内43-47m位置有明显凹陷，出现与已知溶洞模型相似的溶洞异常显示，推测为疑似溶洞（含泥水）。建议此处打钻验证，设计钻孔ZK2，深度5m。

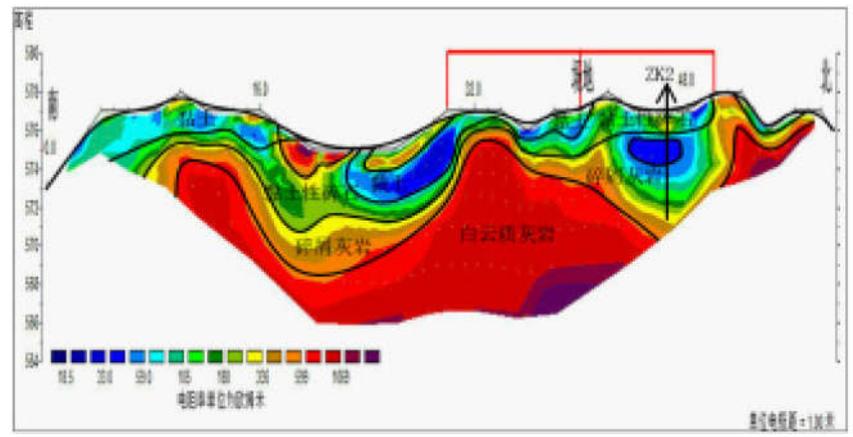


图4 高密度电法G11-5剖面电阻率反演、综合解释图

结束语

验证：在布设的2个钻孔zk1、zk2位置利用钻机进行验证，经2处解释推断异常点验证，验证结果与高密度电法推断结果吻合。探测异常中心深度及平面位置偏差均小于0.5m。

结论：①高密度电法探测溶洞方法有效，勘查效果显著，溶洞高阻（空洞）、低阻（含泥水）异常反映明显，同时本次对破碎层、冲沟等呈现低阻异常显示。②根据野外场地情况及勘查目的可以调整施工装置、参数，效率高，成本低，效果显著。③高密度电法测线布设要灵活，点距要小于探测目标体，确保数据可靠，处理解释推断准确。④地形、基岩等外部条件对资料的解释有较大的影响和误导，在探测的时候应该尽可能的消

除这些影响，所以异常的表现形式为相对异常差异，在做资料解释时应该注意。

参考文献

[1] 刘海生. 高密度电法在探测煤矿地下采空区中的应用研究[D]. 太原理工大学硕士论文, 2006年。

[2] 倪云鹏, 高密度电阻率法在风电场工程物探勘察中的应用研究[J]. 《建筑工程技术与设计》2021年1期。

[3] 何发友, 高密度电法和地质雷达在断层及溶洞探测中的应用[D]. 贵州大学硕士论文, 2008年。

[4] 耿淑莹, 黄向东. 高密度电阻率法在某垃圾填埋场渗漏通道探测中的应用[J]. 《中国煤炭地质》|2020年第7期|68-72|共5页。